

## 東日本大震災の教訓を踏まえた地層処分の安全確保の取り組み

鈴木覚<sup>\*1</sup> 北川義人<sup>\*1</sup> 稲垣学<sup>\*1</sup> 藤原啓司<sup>\*1</sup>

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震とその後の福島第一原子力発電所事故では、原子力施設における大規模な自然災害と操業中の事故への備えを強化すべきことが教訓として得られた。また、地震・断層活動の影響についても、新たに観測された地質現象を踏まえて、その影響を再評価する必要がある。この講演では、これらの震災の教訓を踏まえた原子力発電整備機構における取り組みの状況について報告する。

**Keywords:** 東日本大震災, 地層処分, 操業安全性, 閉鎖後長期安全性

Following the accidents at the Fukushima Daiichi nuclear power plant as a result of the March 2011 earthquake and subsequent tsunami disaster, the potential impact of such a catastrophic earthquake event on the operational and post-closure safety of a geological disposal system has been studied.

**Keywords:** Great East Japan Earthquake, geological disposal, operational safety, post-closure safety

### 1 緒言

原子力発電環境整備機構（以下、NUMO）では、地層処分事業の安全確保に向けた取り組み方針と、地層処分を支える技術の整備状況を、技術報告書「地層処分事業の安全確保（2010年度版）」（以下、2010年技術レポート）として取りまとめた。2010年技術レポートの取りまとめの最終段階であった、2011年3月11日に東北地方太平洋沖地震が発生した。さらに、福島第一原子力発電所事故が発生し、多くの方が避難する事態となつた。

これを踏まえ、地層処分における操業の安全性、とくに放射線安全の確保について、設計想定を超える事象に対する安全対策の裕度の確認を行つた。

また、地震の断層活動の地層処分システムへの影響についても検討した。

### 2 操業期間中の安全確保に関する取り組み

#### 2.1 安全確保の考え方

操業期間中の安全確保については、大きく分けて「放射線安全」と「一般労働安全」がある。このうち、放射線安全については、原子力関連施設の安全対策を適用する。また、一般労働安全については、土木工事やトンネル工事、鉱山開発などの安全対策が適用できる。サイト選定が開始されてから、地域の自然環境などの条件に合わせて安全対策を具体化し、施設設計に反映する計画である。

#### 2.2 異常状態に対する安全対策

Fig. 1に起因事象が発生し、異常状態が進展する様子を示す。

起因事象は、地震、津波などの自然災害が代表例として挙げられる。これらの起因事象が発生したとしても、異常の発生防止策を確保しておく。万が一、これがうまくいかないと施設に異常状態が発生する。例えば、装置の故障や

Study on the operational safety and post-closure safety of geological disposal programme based on the lessons learned from Great East Japan Earthquake by Satoru SUZUKI (ssuzuki@numo.or.jp), Yoshito KITAGAWA, Manabu INAGAKI, Keiji FUJIHARA

\*1 原子力発電環境整備機構 技術部

Nuclear Waste Management Organization of Japan (NUMO)

〒108-0014 東京都港区芝4-1-23 三田NNビル2階

本稿は、日本原子力学会バックエンド部会第29回夏期セミナーにおける

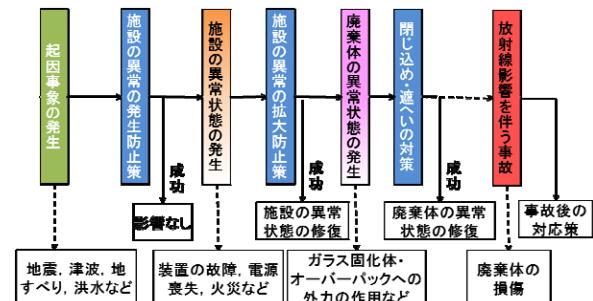


Fig. 1 Event sequence diagram during operation in the geological disposal facility.

電源喪失、火災の発生などが挙げられる。これらの事象がさらに拡大しないように防止策をあらかじめ整備する。しかし、そのような防止策も失敗した場合には、最終的に廃棄体に対して何らかの異常が発生すると考えられる。例えば、落下衝撃や火災による加熱等がある。そのような場合に、閉じ込め・遮へいの対策が有効に機能すれば、事故は防止できるが、対策が失敗した場合には、放射線影響を伴う事故になると考えられる。

ここでは、閉じ込めの対策の頑健性について検討した結果について報告する。

#### 2.3 操業手順

検討の前提条件として、操業手順について示す。

地上施設では、ガラス固化体は輸送容器から取り出し後、受け入れ検査待ちのため、仮置き架台に設置することとした。受け入れ検査やオーバーパックの溶接作業は、高い放射線環境での作業となることから、すべて遠隔操作により実施することを考えている。オーバーパックに溶接封入後、遮へい機能を有する専用の搬送車両に積み込んで搬送する。

地下施設では、ガラス固化体は金属製オーバーパックに封入されており、1日の取り扱い本数は5体程度とした。ここでは堅置き・ブロック定置方式による操業を想定した。

放射線はオーバーパックにより数千分の一に減衰するが、定置作業は遠隔操作で実施する。定置後は坑道を埋め戻すが、この作業中の放射線量は緩衝材によりさらに減衰し、線量が十分に低いので、人が作業することも可能である。また、建設と操業は、別のパネル区画で同時並行に実施するものとした。

## 2.4 異常状態の特定

異常状態を特定するためにイベントツリー分析の手法を参考に、起因事象から発生するさまざまな異常状態と、安全対策の関係とその結果を取りまとめたものを Table 1 に示す。

**Table 1 Summary of incident and accident situations identified by the event analysis.**

起因事象	施設の異常状態	廃棄体などの異常状態	影響を及ぼす安全機能
地上施設	・遮へい壁への地震力の作用		遮へい
	・装置故障→取り扱い中の把持具からの落下	ガラス固化体に対する外力の作用	間に込め
	・電気遮断→換気停止 ・装置故障→取り扱い装置からの出火	ガラス固化体の温度上昇	
オーバーパック、岩盤により遮へい機能は十分な裕度を有する。			遮へい
地下施設	・車両故障→車両走行 ・坑道の漏泄 ・有害ガス(メタンガス)の漏洩 ・警報点定置作業中の落下 ・地下水路の水没	オーバーパックへの外力の作用	間に込め
	人為ミスなど	・車両故障→車両走行→換気車両の火災	オーバーパックの温度上昇

地上施設、地下施設ともにさまざまな異常状態は考えられるが、最終的にはガラス固化体あるいはオーバーパックに外力が作用するか、温度が上昇するかに帰着する。とくにこの2つの事象は放射性物質の閉じ込め機能に影響を与えると考えられる。

Table 1 に示した異常状態については、震災以前の既往の検討ですでに特定していたが、今回はとくに影響の著しい状態について影響を検討する。

## 2.5 地上施設における異常状態に対する頑健性の検討

まず、ガラス固化体の受け入れ検査において、把持具が故障することなどにより、ガラス固化体が落下したことを仮定する。施設では吊り上げ高さを制限などの対策をあらかじめ実施する。このような状況で、ガラス固化体が落下しても、キャニスターが変形するのみで、貫通亀裂が発生し、放射性物質を含むガラスが飛散しないことが、模擬固化体の落下試験によりわかっている[1]。

また、換気停止によるガラス固化体の温度上昇に対する裕度についても検討した。例えば、ガラス固化体 28 本が受け入れ検査のため、仮置き中に 30 日間にわたり電源が喪失し、換気機能が停止した状態を熱解析により評価する。その結果、ガラス固化体の温度は 5 日ぐらいまで急速に上昇し、表面で 200°C 強、中心部の最も高いところで 230°C ぐらいになった。この程度の温度であれば、ステンレスキャニスターの溶融温度に対しては十分に低く、仮に換気機能が比較的長い期間停止しても、放射性物質の放出が起こる可能性がきわめて低いことがわかる。

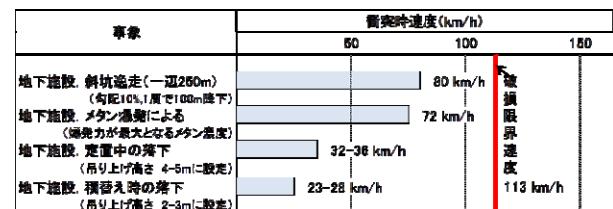
## 2.6 地下施設における異常状態に対する頑健性の検討

地下施設における異常状態の検討では、オーバーパックに対する物理的な衝撃力を見積り、その際の貫通亀裂の発生の可能性を検討した。例えば、搬送車両のブレーキが故障し、搬送車両が斜路を逸走し、坑道の壁面に衝突し、最終的にオーバーパックに衝撃力が作用した状態を考える[2]。なお、このような事態を想定し、施設の設計の際には、

搬送車両のブレーキの二重化、斜路の水平区間の設置（減速区間）、さらに、衝撃緩和区間を設けるなどの対策を取ることができる。この異常状態について、衝突時の速度を見積るために、斜坑を逸走した最大距離を斜坑の一辺の長さとした。また傾斜は 10% とする。

この他にも保守的な想定として、補助ブレーキによる減速がないこと、壁面に衝突しながら逸走する可能性を考慮しない。さらには水平区間や衝撃緩和区間での減速もなく、搬送車両自体に衝撃の緩和を期待しないこととしている。このような保守的な設定に基づいて求めた場合、最高速度は 80km/h となった。

また、例えれば、堅置き方式の処分孔の深さなどを考慮して 5m としたところ、その際の衝突速度が 36km/h である。他にもいくつかの異常状態における衝突速度を検討したが、破損限界速度の 113km/h には達していないことがわかる (Fig. 2)。



**Fig. 2 Comparison of the collision velocity estimated for accident situations in the underground facility.**

以上のことから、異常状態においてオーバーパックに外力が作用しても、貫通亀裂が発生する可能性は極めて低いと考えられる。

## 2.7 異常状態からの復旧策

ここまでに、異常状態に対するガラス固化体、オーバーパックの頑健性を示したが、一方でこれらの異常状態からの復旧も重要である。例えれば坑道落盤に対しては、①岩盤の強度などの特性に応じた支保工の設置・補強、②坑道の耐震性の確認、③(操業期間中の) 点検と補修を実施する。

基本的には、既存の技術を組み合わせることで、対応ができる見通しがある。ただし、今後も関連情報を活用しながら、検討を進めていく必要があると考えている。

## 3 閉鎖後長期の安全確保に関する取り組み

東北地方太平洋沖地震後、断層が多い日本では地層処分は可能かどうか疑問が寄せられている。そこで、地震活断層が地層処分システムに与える影響として、「地震の揺れ」、「活断層によるずれ」、そして、岩盤中の歪の変化などに伴って起こる「地下水特性の変化」に分類し、これらに対する考え方を述べる。

「活断層によるずれ」が直接処分場に達した場合、人工バリアが損傷する可能性がある。したがって、将来にわたり活動する可能性がある断層として、活断層の分布を把握し、その直上に地層処分施設を設置しないようにすることで、安全性を確保する。

また、「地震の揺れ」については、ゆれの影響により人工

バリアが損傷しないことが、大きな地震を想定した振動試験および解析[3]により確認されている。

一方、「地震に伴う地下水の変動」については、地震後、数週間から数ヶ月程度で収束すること、およびその変動幅が小さいことから、地層処分システムに対する影響は小さいと考えていた[4]。

これらの3つの現象については、現在も東北地方太平洋沖地震の観測結果などに基づいて、考え方の妥当性について確認を進めているところである。

このうち、地震に伴う地下水の変動では、東北地方太平洋沖地震後、広域で地下水位の変化が観測されていること、また、その影響が従来の観測よりも長いこと、さらに、その後の余震に伴って、新たな湧水が発生するなど、従来の観測よりも影響が大きい傾向がある。そこで、本講演では、この現象に関する検討状況について述べたい。

### 3.1 広域的な地下水特性の変化

東北地方太平洋沖地震に伴い発生した観測井戸の地下水位の変化は3m未満であり、地震発生時を含む期間の変動範囲（水位の最低値と最高値の差）は数m程度の地下水位の変化がある。今回の地震による水位変化はこの変動範囲に含まれる。

東北地方太平洋沖地震前の知見・見解として、数週間から数ヶ月程度で地下水位は回復しており、地層処分における時間スケールの観点からは、影響は小さいと考えていた。

しかし、同地震の後の知見の追加として、産総研WellWeb[5]にある観測データ（約70）のうち、26データに関して、地震後に水位の変化が認められた。水位変化量は±3m以内であった。多くの例で2~16ヶ月後には回復している。つくば市では、18ヶ月程度経過後においても水位は回復途上にあるが、水位変化は1m程度である。

上記以外にも、比較的震源に近い青森県六ヶ所村の観測事例でも、1m未満である[6]。温泉地では約30mの水位上昇が報告されている例もある[7]。

このような水位の変化が、地下深部の動水勾配の変化として作用することを仮定して、核種移行への影響を評価したが、その影響は著しくないことを確認している。

### 3.2 局所的な地下水特性の変化

2011年4月11日の福島県浜通りの地震後、湧水が継続している事例がある。福島県いわき市の地震による2011年4月11日に発生した福島県浜通りの地震（マグニチュード7.0）の後に、福島県いわき市やその周辺地域の温泉において、湧出量の変化や色の濁りなどの顕著な変化が生じている。いわき市内郷では、アパートの下から約27°Cの温泉が新規に湧き出す現象が起き、多量の温泉水がかつての炭鉱の通気孔から湧出している。具体的には、地震後に水位の上昇が生じた地域は井戸沢断層や湯ノ岳断層（地表に断層が露出）の東側に位置し、一方、水位の低下が生じた地域はこれらの断層の西側や南側に位置している。これらの現象の原因については、現在研究が進められており、今後地層処分への影響について検討を進める計画である。

## 4 まとめ

東日本大震災の教訓を踏まえ、地層処分事業の操業安全性と閉鎖後長期安全性について検討を進めている状況について報告した。地震・断層活動の影響については、今後も学術的な研究開発の動向なども踏まえ、地層処分の安全確保に反映する計画である。

また、この取り組みを今後も継続的に進め、地層処分の安全確保上の課題を把握する。さらに課題に対応して、技術開発を実施し、継続的に改良を実施することで、地層処分事業の安全確保に対する信頼性を向上させていく考えである。

## 参考文献

- [1] 電力中央研究所：ガラス固化体の落下時健全性試験。電力中央研究所研究調査資料。No.U90904 (1990)
- [2] 原子力発電環境整備機構：地層処分事業の安全確保(2010年度版)－確かな技術による安全な地層処分の実現のために－。NUMO-TR-11-01 (2011)
- [3] 核燃料サイクル開発機構：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第2次取りまとめ。分冊2 地層処分の工学技術。JNC TN1400 99-022(1999)
- [4] 核燃料サイクル開発機構：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第2次取りまとめ。分冊1 我が国の地質環境。JNC TN1400 99-021(1999)
- [5] 産業技術総合研究所：地震に関する地下水観測データベース“Well Web”（参照2013年1月25日）<<http://riodb02.ibase.aist.go.jp/gxwell/GSJ/index.shtml>>。
- [6] 大野真知子、福本彦吉、平井哲、向井圭、西本優介：青森県下北半島地域を事例とした東北地方太平洋沖地震及び十勝沖地震に伴う間隙水圧の変動状況。日本地下水学会2012年秋季講演会講演要旨, 92-97 (2012)
- [7] 大塚晃弘、高橋孝行、益子保：平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震に伴ういくつかの温泉の変化。温泉科学 第61巻 第4号, pp.286-291, (2012)

